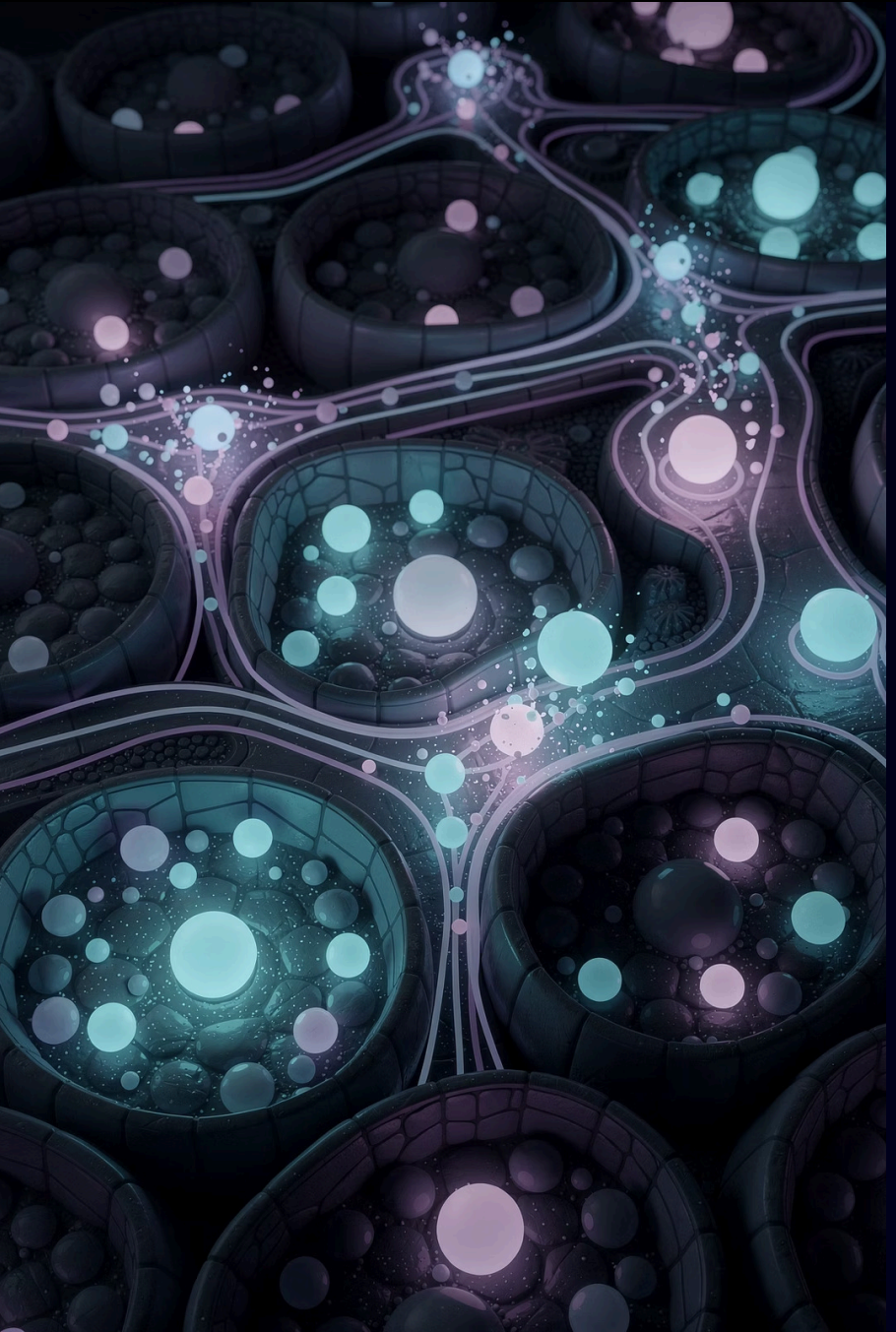
Bitkisel Hormonlar ve Tropizmler

Büyüme, Gelişme ve Çevresel Tepkilerdeki Kontrol Mekanizmaları

Ders Sunumu — *Teradigma*



Fitohormon Nedir?

Bitkisel hayatın tamamını yöneten kimyasal sinyal molekülleri olan fitohormonlar, son derece düşük konsantrasyonlarda bile derin fizyolojik etkiler gösterecek şekilde kurgulanmıştır.

Evrensel Sentez Kapasitesi

Hayvanlardaki özelleşmiş salgı bezlerine gerek duyulmaksızın, bitkinin hemen her hücresi hormon sentezleyebilecek kapasiteyle donatılmıştır.

Vazgeçilmez Koordinatörler

Bu moleküller olmaksızın, bir bitkinin farklılaşmamış bir hücre yığınından ibaret kalacağı ifade edilmektedir.

Yaşam Döngüsü Kontrolü

Tohumun çimlenmesinden yaprakların dökülmesine kadar tüm yaşam döngüsü, bu kontrol ağı üzerinden koordine edilmektedir.

Fitohormonların Biyosentez Öncülleri

Fitohormonlar, kimyasal yapıları temelinde üç ana metabolik öncülden inşa edilmektedir.

Amino Asit Türevlileri

Triptofan ve metiyonin; oksinler, etilen ve salisilik asidin sentezinde öncül molekül olarak görev yapar.

İzoprenoid Türevlileri

Sitokininler, giberellinler, ABA, brassinosteroidler ve strigolaktonlar bu yollaktan türetilir.

Lipit Türevlileri

Jasmonik asit, alfa-linolenik asit gibi lipitlerden sentezlenir.

İşlevsel Sınıflandırma

Fitohormonlar, genel hatlarıyla iki işlevsel grupta incelenebilir; ancak bu ayrım mutlak değildir.

Büyümeyi Teşvik Edenler

Oksinler, sitokininler ve giberellinler bu grup içinde yer alır.

Düzenleyici / Engelleyici Olanlar

Absisik asit ve etilen, yaşlanma, yaprak dökümü ve stres tepkileriyle ön plana çıkar.

Bir hormonun etkisi; bulunduğu dokuya, konsantrasyonuna ve diğer hormonların varlığına bağlı olarak büyük değişkenlik gösterebilir.

Oksin Sinyal Yolağının Moleküler Bileşenleri

Nükleer oksin sinyal yolağı, kimyasal bir sinyalin nasıl hücresel bir tepkiye dönüştürüldüğünü anlamak için model bir sistem olarak kurgulanmıştır.

Üç temel moleküler bileşen üzerine inşa edilmiştir:

1

TIR1/AFB F-box Reseptörleri

Oksin algısından sorumlu reseptör proteinleri.

2

Aux/IAA Transkripsiyonel Baskılayıcıları

Hedef genlerin ifadesini baskılı tutan proteinler.

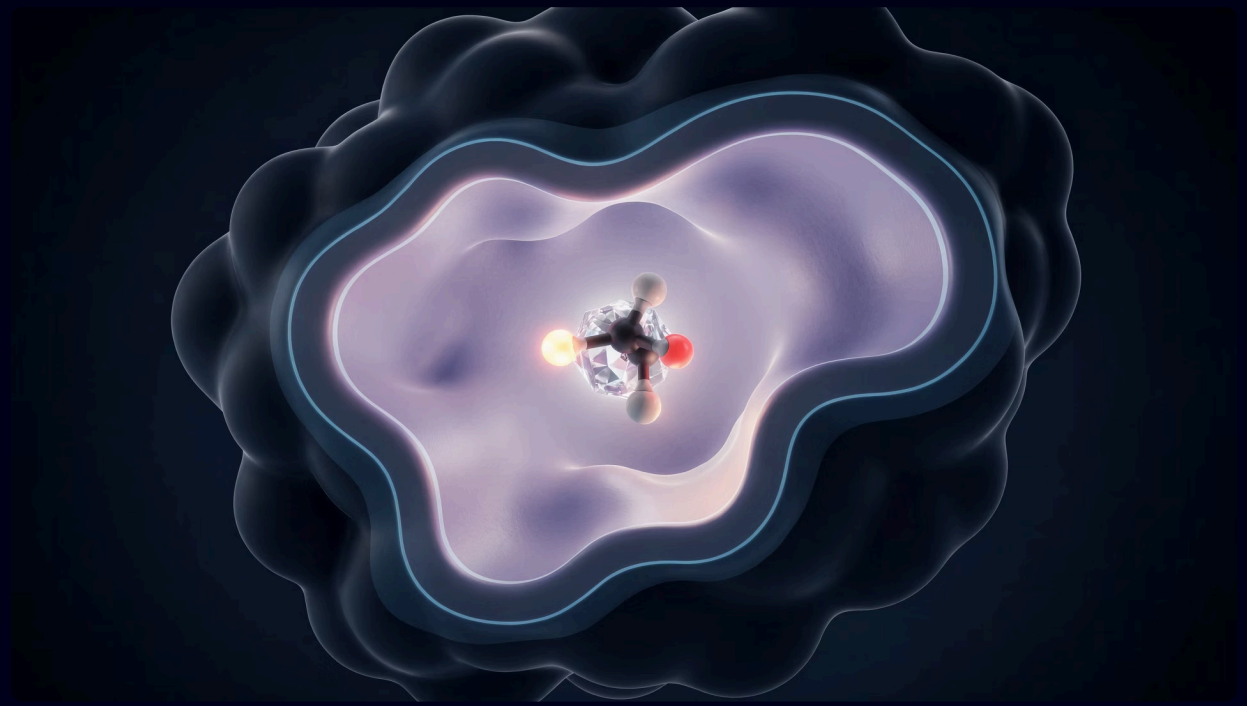
3

ARF Transkripsiyon Faktörleri

Hedef genleri aktive eden veya baskılayan anahtar moleküller.

Oksin Sinyal Yolağı — Adım 1 ve 2

Düşük oksin durumundan yüksek oksin durumuna geçiş, kademeli ve hassas biçimde kurgulanmıştır.



Düşük Oksin Durumunda

Aux/IAA baskılayıcıları ARF transkripsiyon faktörlerine bağlanır; oksine duyarlı genlerin ifadesi baskılanmış tutulur.

Yüksek Oksin Durumunda

Oksin molekülü, TIR1/AFB reseptörünün yüzeyindeki bir cebe yerleşir ve bir "moleküler yapıştırıcı" gibi işlev görerek reseptör ile Aux/IAA arasındaki bağlanma afinitesini artırır.

Oksin Sinyal Yolağı — Adım 3 ve 4

Baskılayıcının ortadan kaldırılması ve gen ifadesinin başlatılması, sistemin nihai çıktısını üretir.

1

Baskılayıcının Parçalanması

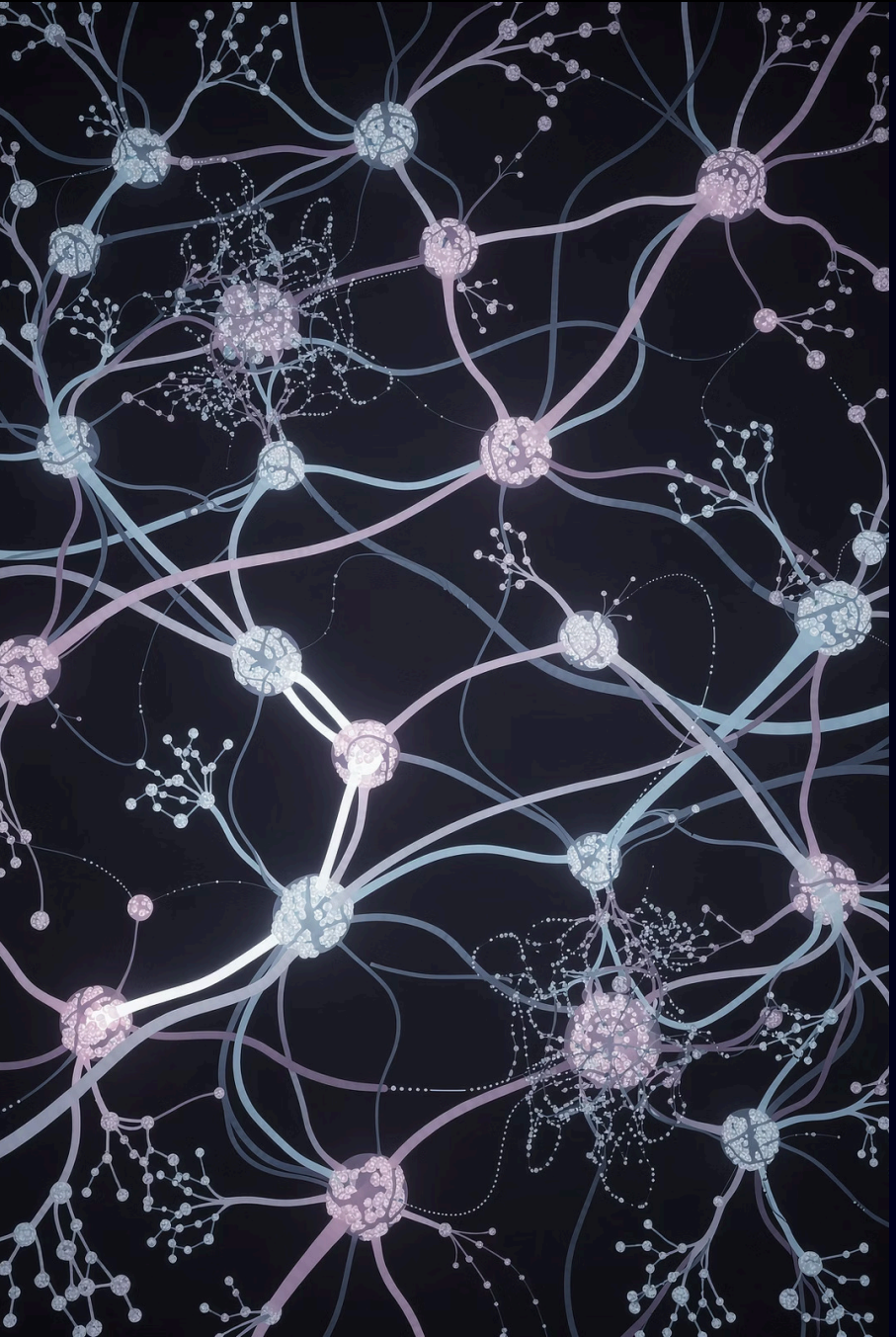
TIR1/AFB–Aux/IAA etkileşimi, baskılayıcı proteinin SCF E3 ligaz kompleksi tarafından ubikitin ile işaretlenmesini tetikler; ardından proteazom bu proteini parçalar.

2

Gen İfadesinin Başlatılması

Serbest kalan ARF, hedef gen promotorlarına bağlanır; hücre bölünmesi, uzaması veya farklılaşması bu genetik yeniden programlamanın sonucunda gerçekleşir.

> Burada bilgi aktarımı, bir enerji dönüşümünden ziyade moleküllerin önceden belirlenmiş üç boyutlu geometrilerinin birbirine uyum sağlaması prensibine dayanmaktadır. Cansız bir karbon atomunun bu üç boyutlu geometriyi kendiliğinden üstlenmesi mümkün değildir.



Hormonal Etkileşim Ağları (Crosstalk)

Bitkisel fizyolojik süreçler, tek bir hormonun lineer komutuyla değil, çok sayıda hormonun dahil olduğu karmaşık etkileşim ağları aracılığıyla yönetilmektedir.

Sinerjistik ve Antagonistik Etkileşimler

Bu etkileşimler, duruma göre **sinerjistik** (birbirini güçlendirici) veya **antagonistik** (birbirini engelleyici) nitelik taşır.

Kök Ucu Meristemi Kontrolü

Kök ucu meristeminin (RAM) büyüklüğü, temel olarak oksin ile sitokinin arasındaki antagonistik denge ile kontrol edilmektedir; sitokinin, PIN genlerinin transkripsiyonunu düzenleyerek oksin taşınımını doğrudan modüle eder.

ABA ve Stres Koşulları

Stres koşullarında merkezi rol oynayan ABA'nın etkinliği, giberellinler ve oksinlerle olan etkileşimleri tarafından ayarlanmaktadır.

Strigolaktonlar ve Stres Ağı

Yeni keşfedilen strigolakton hormon grubu, stres koşullarındaki ağ koordinasyonunun dikkat çekici bir örneğini sunmaktadır.

Birbirine bağlı bu ağın hangi bileşeninin "arızalanacağını" öngörerek yedek yolakların önceden hazır tutulması, tesadüfle açıklanamayacak bir ön bilgi ve planlama gerektirmektedir.

Kuraklık ve Besin Eksikliğinde

Strigolaktonların ABA ve sitokininlerle etkileşerek kök gelişimini ve su alımını düzenlediği tespit edilmiştir.

Çok Yollu Stres Yanıtı

Bu, tek bir stresin bile birden fazla hormonal yolağı eş zamanlı harekete geçirecek şekilde kurgulandığını göstermektedir.

Gelişimsel Plastisite: Ağın Ortaya Çıkan Özelliği

Kök Sistem Mimarisi (RSA), topraktaki besin maddelerinin dağılımına göre dinamik olarak yeniden şekillendirilecek biçimde tasarlanmıştır.

Emergent Özellik

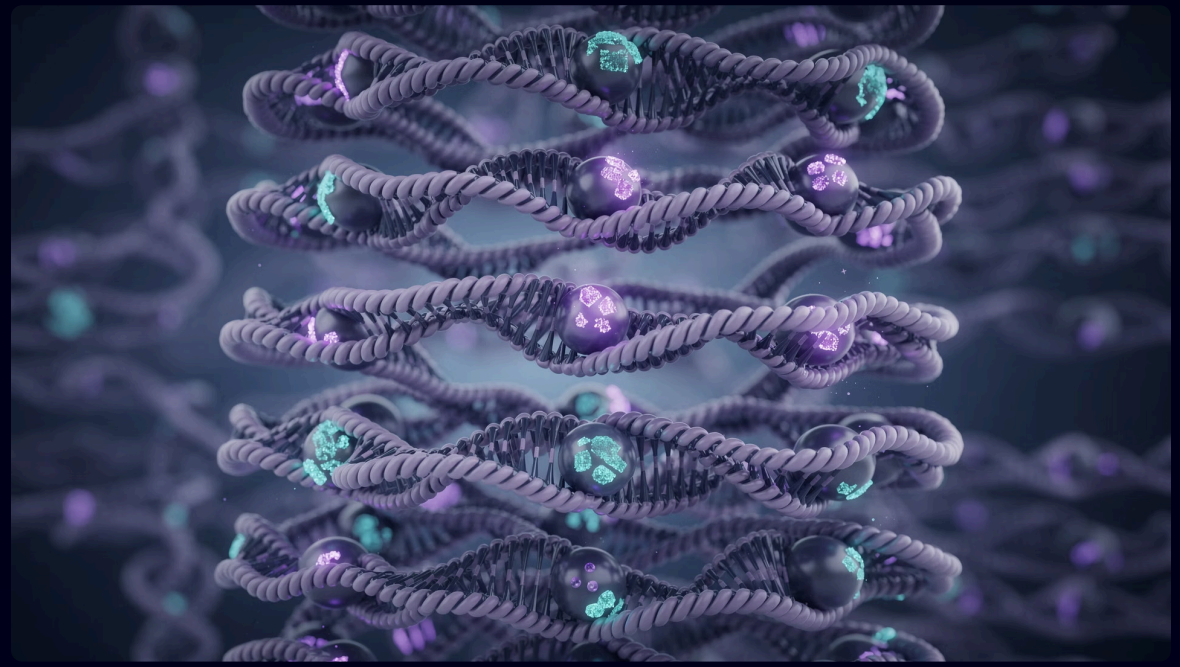
Bu plastisite, tek bir hormonun veya genin değil; çevresel sinyallerin içsel hormonal gelişim yollaklarına entegre edilmesiyle ağın bütününden doğan bir **emergent** (ortaya çıkan) özelliktir.

Hesaplamalı Modellerin Gerekliliği

Bilim insanlarının bu ağları anlamak için karmaşık hesaplamalı modellere başvurması, sistemin basit lineer nedensellik kalıplarını aştığını ortaya koymaktadır.

Epigenetik Düzenleme: Üst Katman Kontrol

Hormonal yollakların ince ayarı, anlık sinyal etkileşimleriyle sınırlı kalmayacak şekilde kurgulanmıştır; epigenetik mekanizmalar bu düzenlemenin üst katmanını oluşturur.



DNA Dizisi Değiştirilmeksizin Kontrol

DNA metilasyonu ve histon modifikasyonları gibi süreçler hormonal yollakları kontrol eder; DNA dizisi bu süreçte değiştirilmez.

Kilit Genlerin Susturulması

YUC ve *PIN* gibi kilit genlerin promotor bölgelerindeki H3K27me3 işaretleri, bu genlerin ifadesini susturabilir ve gelişimsel süreçlere bağlı olarak eklenip çıkarılabilir.

Stres Hafızası ve Nesiller Arası Aktarım

Bitkilerin geçmişte maruz kaldıkları stresleri "hatırlayabilmesi", sistemin salt anlık tepkilerle sınırlı olmadığını gösteren dikkat çekici bir örnek oluşturmaktadır.

Epigenetik Değişikliklerin Aktarımı

Stresin tetiklediği epigenetik değişiklikler sonraki nesillere aktarılabilmekte; yavru bitkiler, atalarının karşılaştığı strese daha hızlı ve daha güçlü yanıt verecek şekilde önceden hazırlanmış olmaktadır.

ABA ve Oksin ile İlişkili Yeniden Programlama

Bu hafızanın, ABA ve oksin ile ilişkili genlerin epigenetik olarak yeniden programlanması yoluyla işlediğine dair güçlü kanıtlar bulunmaktadır.

> Nesilden nesile aktarılan bu "bilgi kaydının" cansız atomlar tarafından kendi kendine kurulması mümkün değildir; bu, bir hafıza mimarisinin önceden tasarlanmış olmasını zorunlu kılar.

Tropizma: Tanım ve Sınıflandırma

Tropizma, bir bitkinin veya organının yönlü bir uyarana karşı sergilediği yönelimli büyüme hareketi olarak tanımlanmaktadır.

Hareketin yönünün uyarana bağlı olması, onu yönden bağımsız nastik hareketlerden ayırır.

Fototropizma

Işığa yönelik büyüme

Gravitropizma

Yerçekimine yönelik büyüme

Tigmotropizma

Dokunmaya yönelik büyüme

Hidrotropizma

Suya yönelik büyüme

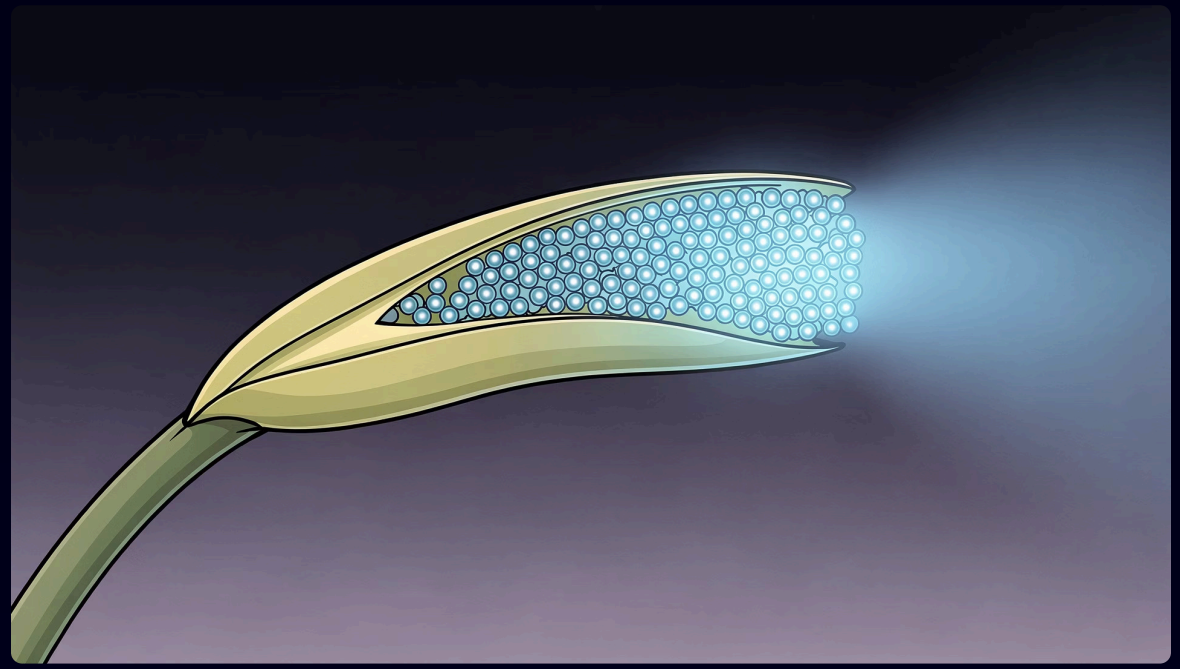
Kemotropizma

Kimyasal maddelere yönelik büyüme

Hareketler, uyarana doğru (pozitif) veya uyarandan uzağa (negatif) yönelimli olabilir.

Fototropizma — Algılama ve Sinyal Dönüşümü

Işığa doğru bükülme hareketi, çok adımlı bir moleküler bilgi işleme sürecinin sonucunda gerçekleşmektedir.



Algılama

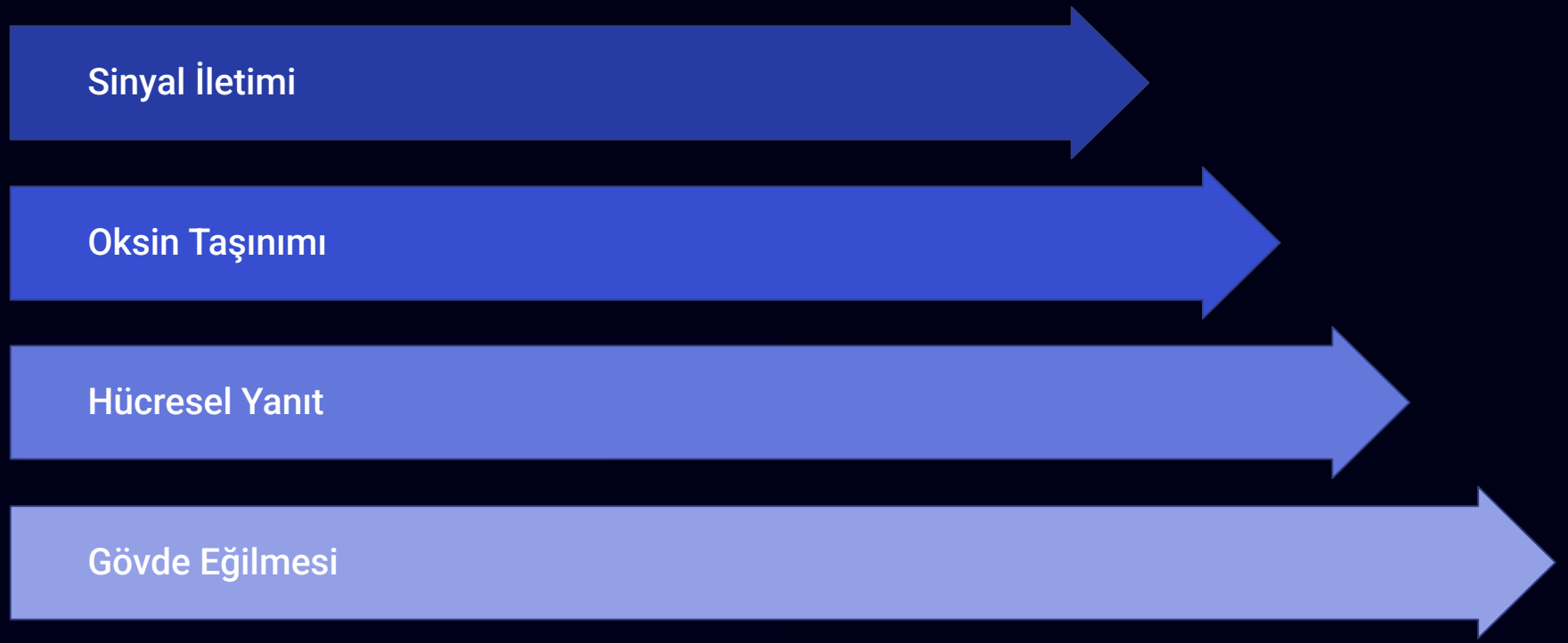
Koleoptil hücrelerinin plazma zarlarında konumlandırılmış fototropin (phot1 ve phot2) fotoreseptör proteinleri, yönlü mavi ışığı algılar.

Sinyal Dönüşümü

Işığın algılanması, fototropin proteinlerinin otofosforilasyonunu tetikler; bu olay NPH3 gibi proteinlerin fosforilasyon durumunu değiştiren ve hücre duvarı pH'ını etkileyen bir sinyal kaskadını başlatır.

Fototropizma — Sinyal İletimi ve Yanıt

Sinyal kaskadının en kritik çıktısı, oksinin asimetrik olarak yeniden dağıtılmasıdır.



Gölgedeki yüksek oksin konsantrasyonu, o bölgedeki hücrelerin daha fazla uzamasını uyarır; ortaya çıkan diferansiyel büyüme, gövdenin ışık kaynağına doğru bükülmesiyle sonuçlanır.

Fototropizma — Bütünleşik Sistem Analizi

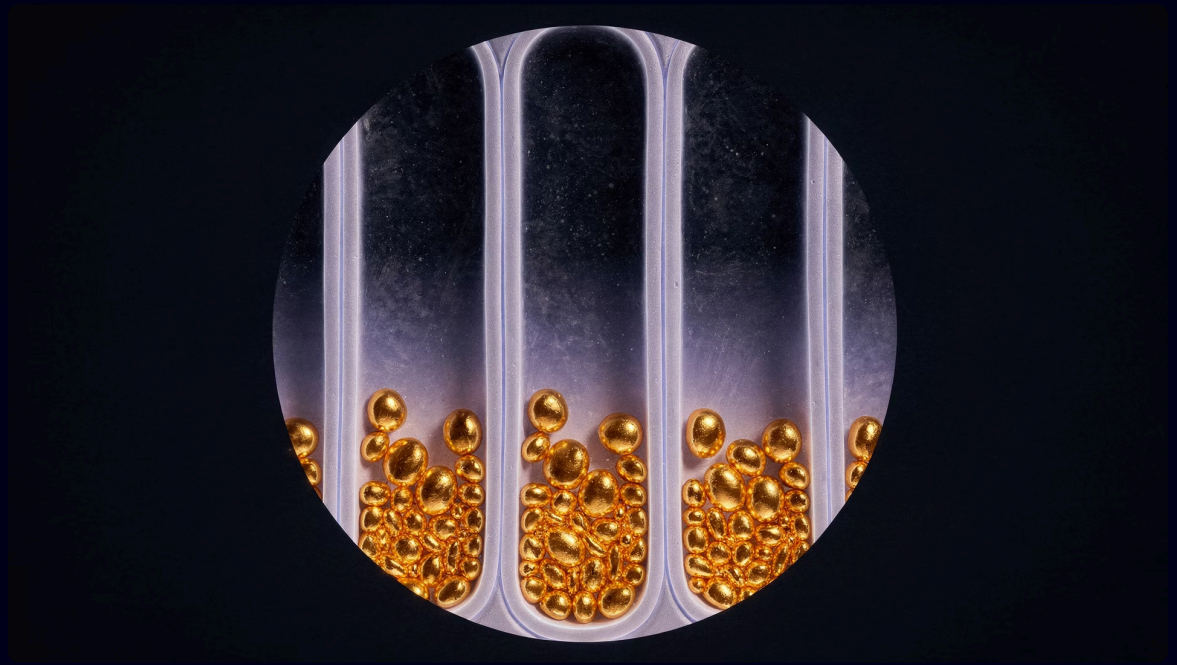
Fototropizma, birbirinden farklı bileşenlerin tek bir amaca yönelik olarak bütünleştirildiğinin açık bir örneğini sunmaktadır.

Bileşen	İşlev
Fototropin-1 (PHOT1)	Mavi ışığı algılama; sinyal kaskadını başlatma
Oksin (IAA)	Asimetrik dağılımıyla diferansiyel büyümeyi tetikleme
PIN ailesi taşıyıcıları	Oksin akışının yönünü belirleme
Hücre iskeleti (Aktin)	PIN'lerin polar konumlandırılmasını sürdürme

⚠ Bu bileşenlerden herhangi birinin eksikliği, tüm sistemin işlevsiz kalmasına neden olur.

Gravitropizma — Algılama ve Sinyal Dönüşümü

Köklerin yerçekimi yönünde büyümesi, kendine özgü algılama organelleri üzerinden kurgulanmış bir süreçtir.



Algılama

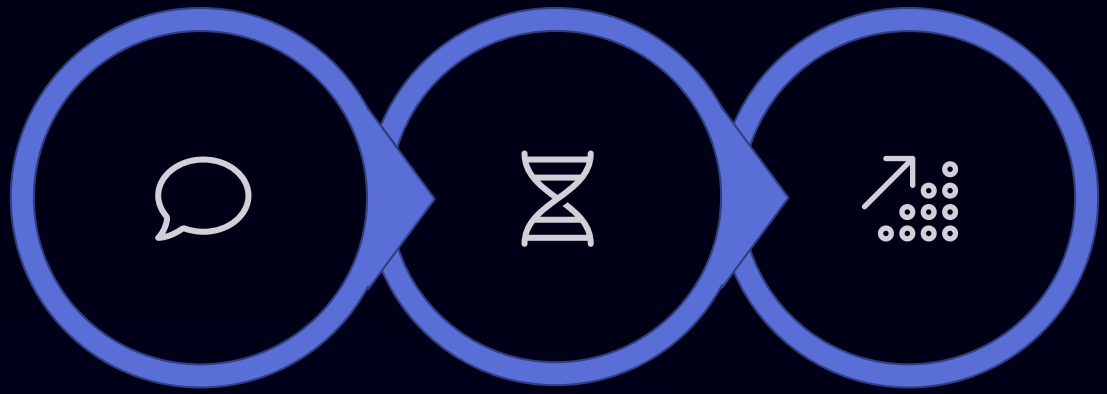
Kök şapkasının merkezindeki (kolumella hücreleri) **statosit** adı verilen özelleşmiş hücreler, nişasta ile dolu yoğun **amiloplast (statolit)** organelleri içerecek biçimde donatılmıştır.

Sinyal Dönüşümü

Kökün yönü değiştiğinde, yoğun statolitler hücrenin yeni "alt" kısmına çöker; bu fiziksel olayın gravitropik sinyali tetiklediği düşünülmektedir *(Nişasta-Statolit Hipotezi)*.

Gravitropizma — Sinyal İletimi ve Yanıt

Statolitlerin çökmesinin ardından oksin akışı yeniden düzenlenmekte ve asimetrik bir büyüme yanıtı oluşturulmaktadır.



Kök hücrelerinde yüksek oksin konsantrasyonu uzamayı *engeller*; bu nedenle alt taraf yavaşlarken üst taraf normal hızda uzamaya devam eder ve kök aşağıya, yerçekimi yönüne doğru kıvrılır. Son çalışmalar, oksinin bu süreçte hem yanıtta aracı olduğunu hem de statolit üretimini düzenlediğini göstermektedir.

Uzay Biyolojisi: Gravitropismin Sınırları

Uluslararası Uzay İstasyonu'nda (ISS) yürütülen CARA ve APEX03-2 deneyleri, kök gelişimine dair temel varsayımları sorgulamıştır.

Temel Oksin Akış Modelinin Korunması

Kök ucundaki temel oksin akış modelinin ("ters çeşme" modeli) mikro yerçekimi ortamında dahi korunduğu gösterilmiştir; bu, söz konusu dağılım modelinin yerçekimi tarafından *oluşturulmadığını*, kök gelişiminin *içsel* bir parçası olduğunu ortaya koymaktadır.

Yerçekiminin Modülatör Rolü

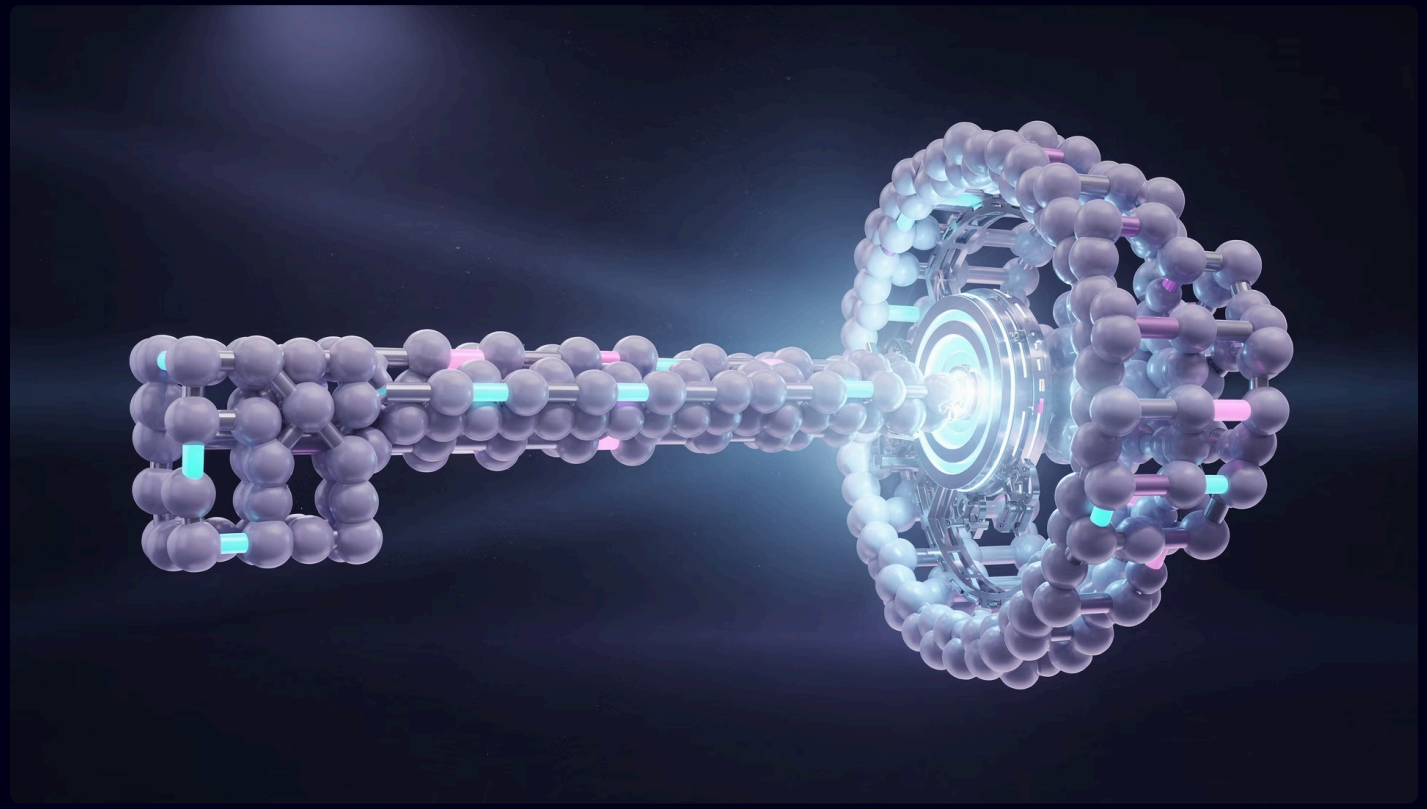
Yerçekimi, bu önceden var olan deseni büyümeyi yönlendirmek için *modüle eder*, sıfırdan oluşturmaz.

Gen İfadesi Değişiklikleri

Uzay uçuşu koşullarında oksin ve sitokinin yollakları, hücre duvarı gelişimi ve stres yanıtlarıyla ilgili genlerde önemli ifade değişiklikleri tespit edilmiştir.

Moleküler Tanıma ve Hassas Ayar

Oksin sinyal yolağındaki "moleküler yapıştırıcı" modeli, sistemin temelinde son derece hassas bir tanıma mekanizmasının bulunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Binlerce farklı molekül arasından yalnızca kendi hedef proteinine, bir anahtarın kilide uyduğu gibi bağlanan bu hassas geometri, bu geometriyi bilen ve bu uyumu önceden planlayan bir Fail'in varlığını zorunlu kılmaktadır.

Üç Boyutlu Geometrik Tanıma

İşlev, kimyasal bir reaksiyona değil; hormonun ve reseptörünün birbirini tamamlayan **üç boyutlu geometrik şekillerine** bağlıdır.

Reostat Gibi Çalışan Sinyal Yolları

Bağlanma afinitelerinin ince ayarı, sinyal yollarının basit bir "açık/kapalı" anahtarı gibi değil, niceliksel ve kontrollü yanıtlar üretebilen **reostatlar** gibi çalışmasını sağlar.

Failin Doğru Atfedilmesi: Bir Epistemolojik Not

Bilimsel literatürde yaygın olan "oksin büyümeyi uyarır" veya "fototropinler tepkilere aracılık eder" ifadeleri, felsefi bir titizlikle incelendiğinde önemli bir sorun barındırmaktadır.

Oksin "Seçmez"

Oksin, büyümeyi "seçmez"; oksinin belirli bir konsantrasyonda, önceden kurulmuş bir reseptörler ve sinyal elemanları sistemi içinde **bulunması**, hücre uzaması sürecinin **başlatılmasıyla sonuçlanır**.

Pasif Anahtar, Hazır Kilit

Molekül, pasif bir anahtardır; o anahtarın uyduğu kilit ve açtığı mekanizma, zaten yerli yerinde mevcuttur.

İsimlendirme ile Açıklama Arasındaki Fark

"Fototropizma" ve "gravitropizma" gibi terimler bir olguyu açıklamaz, yalnızca isimlendirir; gerçek açıklama, bu ismin arkasındaki mekanizmanın adım adım tarif edilmesinde yatar.

Hammadde ile Sanat Arasındaki Derin Uçurum

Bu sistemleri oluşturan atomlar ile bu atomlardan inşa edilen fonksiyonel bütün arasındaki fark, dersin en temel felsefi sorusunu gündeme getirmektedir.

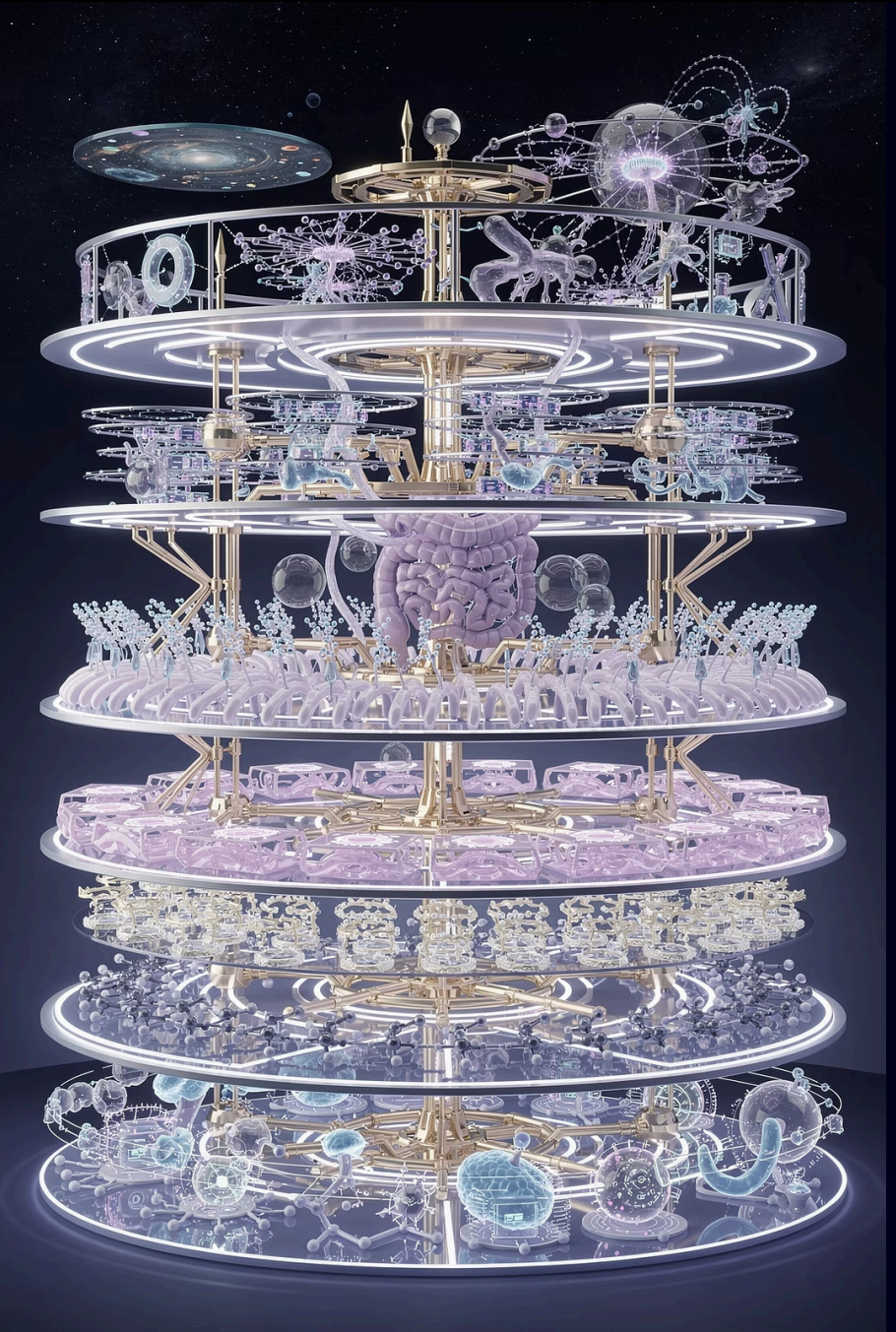
Hammadde

Hormonları, proteinleri ve DNA'yı oluşturan karbon, hidrojen, oksijen ve azot atomlarıdır; bu atomların ışığın yönünü "bilmesi" veya bir sinyali "taşıması" mümkün değildir.

Sanat

Bu atomlar, DNA dizilimi, protein katlanması ve ağ mimarisi gibi belirli bir sıra ve düzen içinde bir araya getirildiğinde; ışığı algılayan, yerçekimini kaydeden, bilgi işleyen ve kendini çevresine göre ayarlayan bir bütün ortaya çıkmaktadır.

> *PIN2* genindeki nükleotid dizilimi veya TIR1 reseptörünün üç boyutlu yapısı, rastgele değil belirli bir işlevi yerine getirmek üzere özelleşmiş karmaşık bir bilgidir. Bu bilginin kökeni, maddenin kendisinden daha üst bir düzlemde — ilim, irade ve kudret sahibi bir Yaratıcı'da — aranmalıdır.



Sentez: Bitkisel Kontrol Sisteminin Bütüncül Tablosu

Bu derste incelenen mekanizmalar, birbirini tamamlayan katmanlı bir kontrol mimarisinin varlığını ortaya koymaktadır.

Moleküler Düzey

Oksin sinyal yolağının "moleküler yapıştırıcı" mekanizması, kimyasal bilginin geometrik uyum üzerinden iletildiğini göstermektedir.

Ağ Düzeyi

Crosstalk, plastisite ve emergent özellikler, sistemin parçaların toplamını aşan bir bütün olarak tasarlandığına işaret etmektedir.

Tarihsel Düzey

Epigenetik stres hafızası, bu mimarinin yalnızca anlık tepkiler için değil, nesiller boyu sürecek bir uyum için de kurgulandığını ortaya koymaktadır.

Uzay Boyutu

Mikro yerçekimi deneyleri, kök gelişimindeki temel oksin dağılım modelinin içsel ve önceden var olan bir tasarım ürünü olduğunu doğrulamaktadır.